

ВІДГУК

офіційного опонента Лавріненка Валерія Івановича на дисертаційну роботу Ліщенко Наталі Володимирівни «Підвищення продуктивності профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК на основі адаптації елементів технологічної системи», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

Дисертація, що була надана до опонування, складається з 2-х анотацій на державній та англійській мовах, вступу, шести розділів з висновками наприкінці кожного розділу, висновків, списку використаних джерел (сумарно із 255 найменувань), які розбиті на кожний розділ, та окремого тому додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи (в 2-х томах) складає 687 сторінок, з них: 106 рисунків по тексту, 15 рисунків на окремих 15 сторінках, 32 таблиці по тексту, список використаних джерел з 255 найменувань на 26 сторінках, 21 додаток на 354 сторінках.

Актуальність теми. Зубчасті передачі, внаслідок їхнього високого коефіцієнту корисної дії (0,95–0,99), досягнутому конструкторами ресурсу та можливості передавати будь-яке значення механічної потужності – найпоширеніші складові трансмісії машин та механізмів. Найвідповідальнішими деталями зубчастих передач є зубчасті колеса. Зубчасті колеса широко застосовуються в машинобудівній промисловості України: в двигуно-, автомобіле-, судно-, авіабудуванні, а також у гірничо-видобувній промисловості, енергетиці тощо. Від точності їх виготовлення і правильності монтажу залежить надійність та безшумність роботи машини. Безумовно, основним методом фінішної обробки зубчастих коліс, виготовлених з конструкційних легованих хромонікелевих та хромомарганцевих сталей, наприклад, сталей 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18ХГТ, 20ХГТ тощо, цементованих та загартованих до HRC 56–65, є насамперед зубошліфування. Свого часу переважно загартовані зубчасті колеса піддавали обробці методом обкату двома тарілчастими кругами на зубошліфувальних верстатах типу MAAG для отримання високої точності коліс. Свого часу ці верстати дуже часто використовувались для змінних умов багатомініклатурного дрібносерійного виробництва, але вони мають низьку адаптованість до таких умов та високу трудомісткість обробки, налагодження та обслуговування.

У сучасних умовах на підприємствах України альтернативою верстатам типу MAAG є верстати з ЧПК для профільного зубошліфування з набагато більшими технологічними можливостями, наприклад, зубошліфувальні верстати мод. Höfler RAPID 1250. Разом з тим, профільне зубошліфування при більш високій продуктивності в той же час відзначається і більшою теплонапруженістю процесу обробки, а це, як наслідок, може призводити до появи шліфувальних припикань та мікротріщин в приповерхневому шарі

обробленої поверхні. Саме тому, операція профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК залишається найбільш трудомісткою в технологічному процесі механічної обробки загартованих зубчастих коліс. У зв'язку з цим, автор даної дисертаційної роботи звертає увагу на актуальність пошуку технологічних ресурсів для підвищення продуктивності операції профільного зубошліфування і необхідність розробки технологічних передумов для створення відповідних підсистем проектування, моніторингу та технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, що дозволить реалізувати вказану адаптацію технологічної системи до більш високої продуктивності шляхом урахування індивідуальних характеристик її елементів.

Актуальність досліджень також підтверджується тим, що робота виконана у відповідності до держбюджетних тем, які мають ДР № 0113U001462 та ДР № 0118U004400 (стор. 18 дисертації та стор. 2 автореферату).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовано і обґрунтовано в роботі, базуються на загально визнаних підходах технології машинобудування, теорії різання металів, теорії автоматичного керування, теорії інформації і теорії сигналів. Автором застосовані загально визнані та спеціальні методи дослідження та моделювання, у тому числі частотне перетворення Фур'є та спектральний аналіз для сигналу обмірюваного припуску, технологічна теплофізика для дослідження аналітичних рішень диференціального рівняння теплопровідності, статистика для розробки стохастичних моделей при визначенні максимального припуску на зубошліфування, методи аналітичної і диференціальної геометрії для визначення інтенсивності шліфування, геометричних параметрів шару, що піддається видаленню, тощо.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність отриманих результатів підтверджується обґрунтованістю прийнятих допущень, коректним використанням математичного апарату, експериментальними дослідженнями та даними впровадженень. А також використанням сучасного обладнання з ЧПК (зубошліфувального верстата мод. Höfler RAPID 1250, координатно-вимірюваної машини Global), автоматизованої системи наукових досліджень (NI-DAQmx та NI-LabVIEW), пакетів прикладних програм типу MathCAD, MatLAB, LabVIEW, AutoCAD, COMSOL Multiphysics, а також сучасних засобів комп'ютерної схемотехніки.

До основних нових наукових результатів дисертації на погляд опонента слід віднести наступне.

1. Вперше розроблено методи визначення максимального припуску, величина якого адаптована до результатів його вибіркового вимірювань шляхом відновлення сигналу припуску на основі теореми відліків і

стохастичного моделювання припуску.

2. Вперше розроблено метод визначення інтенсивності профільного зубошліфування на основі сформульованої і доведеної теореми про еквівалентний прямокутний профіль, відповідно до якої розраховують миттєву активну ширину криволінійного профілю круга через ширину еквівалентного (за інтенсивністю шліфування) прямокутного профілю, встановленого на ту ж глибину шліфування.

3. Вперше сформульовано і доведено теорему про інваріантність екстремальних значень припуску відносно положення початкової западини на зубчастому колесі незалежно від обраного методу вирівнювання припуску.

4. Отримало подальший розвиток дослідження наступності три-, дво- і одновимірних аналітичних рішень диференціального рівняння теплопровідності і знайдено умови застосування двовимірної рішення для визначення температури зубошліфування: безрозмірна напівширина теплового джерела (число Пекле) $H \geq 4$ і виконання умови $H/L < 1$ для прямокутної форми плями контакту, яка має габаритні розміри $2H \times 2L$, що дозволило спростити математичне забезпечення вбудованих комп'ютерних підсистем.

5. Отримала подальший розвиток математична модель для визначення температури шліфування при примусовому охолодженні з урахуванням впливу коефіцієнта теплообміну і температури мастильно-охолоджувальної рідини, що дозволило для вирівнювання температури по периферії зубчастого колеса обирати режими на чистовому етапі зубошліфування, тобто за рахунок адаптації структури циклу зубошліфування до фактичного розподілу температури.

6. Отримала подальший розвиток математична модель для визначення температури макро- і мікропереривчастого шліфування, а також для оптимізації частоти і скважності макро- і мікроімпульсів теплового потоку за критерієм найменшої температури переривчастого шліфування при однаковій середній щільності імпульсного теплового потоку, яка характеризує однакову інтенсивність шліфування; що дозволило виявити параметри для оптимізації і інтервали їх оптимального значення: число N різальних елементів на високопоруватому шліфувальному крузі ($N > 180$) і коефіцієнт s заповнення окружного кроку цих елементів ($s > 0,5$).

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Отримані результати у дисертаційній роботі носять узагальнений характер і можуть бути використані як при абразивній обробці зубчастих коліс, так і при профільній абразивній обробці. Здобувачем удосконалено інформаційну модель технологічної системи профільного зубошліфування як об'єкта керування, який має вхід (режими зубошліфування), стан (сила і температура шліфування, акустична емісія) і вихід (параметри точності,

якості поверхні і поверхневого шару). Вперше на основі комп'ютерного імітаційного моделювання вивчено перехідний процес формування температурного поля навколо рухомого теплового джерела і встановлено час теплового насичення, який більш ніж вдвічі перевищує відношення ширини джерела до швидкості його переміщення. Отримало подальший розвиток комп'ютерне імітаційне моделювання профільного зубошліфування, що дозволило встановити умови застосування одновимірного аналітичного рішення диференціального рівняння теплопровідності для визначення температури зубошліфування в окремих точках зони контакту. Одержала подальший розвиток розробка підсистем підтримки життєвого циклу зубчастих коліс на операції профільного зубошліфування, що дозволило розробити вбудовані підсистеми комп'ютерного проектування, моніторингу та технологічної діагностики операції. На основі вказаного автором розроблена низка способів і методик для фінішної обробки зубчастих коліс.

Практичне рішення проблеми підвищення продуктивності фінішної обробки зубчастих коліс дозволяє використовувати даний досвід при рішенні подібних проблем на практиці. У цьому плані дисертація Ліщенко Н.В. вносить помітний вклад у теорію й практику фінішної абразивної обробки деталей. Практичне значення одержаних результатів для машинобудівних підприємств полягає в тому, що розроблено методику визначення максимального припуску на зубошліфування, розроблено спосіб визначення числа вимірів припуску на етапі налагодження верстата з ЧПК, виконано широкі виробничі випробування високопоруватих шліфувальних кругів (з електрокорунду, монокорунду, золь-гель корунду), а також кругів з рубін-корунду, розроблено методику визначення режимів при припустимій температурі високопродуктивного бездефектного зубошліфування на попередніх етапах обробки і відсутності накопичення тепла від попередніх робочих ходів на останньому етапі на основі встановленого взаємозв'язку між питомою роботою і температурою шліфування, розроблено спосіб вирівнювання припуску на етапі налагоджування зубошліфувальних верстатів з ЧПК без внесення корекції в кутове положення зубчастих коліс, що дозволило організувати ділянку зубошліфувальних верстатів на основі одного верстата з ЧПК, розроблено спосіб визначення інтервалу правки профільного шліфувального круга шляхом контролю частки ефективних робочих ходів у загальному їх запрограмованому числі, тобто з урахуванням фактичного завантаження шліфувального круга, розроблено структурні схеми автоматизованих підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК, що дозволило адаптувати технологічну систему зубошліфування до більш високої продуктивності обробки.

Результати роботи впроваджено у виробництво на ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» з річним економічним ефектом 1142661 грн і в навчальний процес у Сумському державному університеті, Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у низці наукових робіт, які подані дисертантом у авторефераті та у дисертації в «Списку публікацій здобувача за темою дисертації» на стор. 9–17, причому це відображено у 65 наукових публікаціях, з яких: 29 статей у наукових фахових виданнях України (9 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 7 – у закордонних виданнях, 5 у вигляді патентів України на корисну модель, 24 – у збірниках наукових праць і у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. Опубліковані роботи досить повно відбивають основні положення дисертації і не суперечать її основним висновкам. Участь автора у багатьох міжнародних науково-технічних конференціях та оприлюдненні роботи у повному обсязі є достатньою для апробації роботи.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація представляє завершену наукову роботу, яка має внутрішню єдність, сукупність наукових теоретичних положень і експериментальних результатів, що свідчить про суттєвий індивідуальний внесок здобувача в науку.

У **першому розділі** виконано аналіз трудомісткості технологічного процесу виготовлення зубчастих коліс. Показано, що частка витрат часу на зубошліфувальну операцію в загальному технологічному процесі складає від 40 до 70 %. Тому задача підвищення продуктивності такої операції на верстатах з ЧПК при забезпеченні якості поверхневого шару і точності обробки є актуальною. Розглянуто технологічні можливості існуючих методів зубошліфування. Встановлено, що найбільше застосування одержали методи копіювання та обкату, відповідно, профільним і черв'ячним шліфувальними кругами. Обґрунтовано актуальність розробки вбудованих підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики при зубошліфуванні в умовах автоматизованого виробництва, яка обумовлена відсутністю детермінованих зв'язків між вихідними (точність і якість обробки) і вхідними керуючими параметрами (режими зубошліфування) технологічної системи.

В **другому розділі** наведено методологію наукових досліджень, яка включає моделювання, оптимізацію і керування для забезпечення адаптації елементів технологічної системи до більш високої продуктивності обробки при зубошліфуванні. Запропоновано метод імітаційного моделювання припуску на основі віртуальних приладів, які формують сигнал, що містить систематичну та випадкову компоненти припуску. Розроблено стохастичну і детерміновано-стохастичну моделі припуску, на основі яких синтезовано алгоритми визначення максимального припуску за результатами його вибіркового дискретних вимірів в окремих западинах ЗК залежно від числа виконаних вимірів: до 4-х (через різницю однобічних припусків, тобто накопичений окружний крок) і більше 8-ми (через однобічний припуск і

накопичений окружний крок). Тим самим, в розділі досліджено фактори, які зумовлюють продуктивність операції: припуск, який видаляється, інтенсивність зубошліфування і об'єм матеріалу, що видаляється на одиницю активної ширини профілю шліфувального круга.

В розділі 3 розглянуто аналітичний спосіб визначення температури зубошліфування. Закономірність зменшення температури переривчастого шліфування дає можливість автору висунути наукову гіпотезу про наявну тенденцію заміни макропереривчастих кругів відповідними за габаритними розмірами високопоруватими (мікропереривчастими) шліфувальними кругами. Автор звернула увагу на те, що особливістю високопоруватих кругів є наявність груп зерен (різальних ділянок або «виступів», розділених порами), які є в певній мірі штучними різальними «виступами», що мають змінні параметри. Вказується, що перевагою високопоруватих шліфувальних кругів, у порівнянні із макропереривчастими шліфувальними кругами, є відсутність їх додаткової механообробки по формуванню ріжучих виступів на крузі, оскільки теплові джерела – ділянки різальних зерен круга між порами – формуються природним чином при виготовленні високопоруватих шліфувальних кругів. Тим самим, у розділі не тільки досліджено аналітичні моделі температурного поля, в тому числі з урахуванням охолодження, але і отримано формулу для визначення максимальної температури при макро- і мікропереривчастому шліфуванні.

В розділі 4 наведено експериментальні дослідження звичайних і високопоруватих шліфувальних кругів і виконано імітаційне моделювання температурного поля при профільному зубошліфуванні. Надаються відомості по експериментальному дослідженню якості поверхневого шару на різних ділянках евольвентного профілю западини зубчастого колеса. Методом планування багатofакторного експерименту встановлено зв'язок режимів обробки з потужністю шліфування, питомою роботою та щільністю теплового потоку, у тому числі з урахуванням пружного відтиску при шліфуванні. Тим самим, у розділі виконані експериментальні дослідження параметрів стану технологічної системи, високопоруватих шліфувальних кругів, а також виконано імітаційне моделювання температурного поля, яке дозволяє встановити вплив кривизни евольвенти і змінної щільності теплового потоку на температуру.

В розділі 5 виконано розробку технологічних передумов для відповідної вбудованої підсистеми проектування (розрахунку режимів) профільного зубошліфування, виходячи з вимоги адаптації елементів технологічної системи з урахуванням температури шліфування. Для цього виконано аналіз структури циклу зубошліфування на верстаті з ЧПК. Встановлено елементи цієї структури: послідовність виконання вимірювальних циклів; кількість етапів і робочих ходів у кожному з етапів; кількість правок на кожному етапі; послідовність обробки западин; напрямок ходу обробки западин. Тим самим, у розділі досліджено теоретичні передумови для визначення високопродуктивних режимів зубошліфування з урахуванням температури в зоні різання, розроблено методику визначення

нормальної і вертикальної глибин шліфування, наведено взаємозв'язок режимних параметрів з температурою в зоні різання при вирішенні прямої і зворотної задач.

В розділі 6 представлено теоретичні передумови для розробки вбудованих підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, а також способи, які враховують індивідуальні особливості зубчастого колеса та інших елементів технологічної системи. Тим самим, в розділі розроблено теоретичні передумови для створення комп'ютерних підсистем проектування, моніторингу і технологічної діагностики операції зубошліфування, розроблено спосіб вирівнювання припуску, який дозволяє організувати ділянку зубошліфувальних верстатів.

Висновки сформульовано чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Додатки розміщено у окремому томі і є фактично документально підтвердженим експериментальним обґрунтуванням тих теоретичних розробок, що наведені здобувачем у основному томі дисертації. В додатках на стор. 279 наведений висновок ПАТ «ХМЗ «Світло шахтаря» про корисність розробок, виконаних в докторській дисертації здобувача Ліщенко Н.В., а далі на 10 сторінках з 280 по 290 наведений детальний розрахунок річного очікуваного ефекту від впровадження її розробок на суму 1142661 грн., що безумовно є вражаючим і підтверджує фундаментальний підхід здобувача до своїх розробок.

Список використаних джерел досить повний із 255 найменувань і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації, а також публікації здобувача.

Автореферат за структурою і оформленням відповідає вимогам, а його зміст відображає зміст дисертації.

В представлений докторській дисертації Ліщенко Н.В. не використано результатів її кандидатської дисертації «Забезпечення бездефектного високопродуктивного різьбошліфування ходових гвинтів на основі комп'ютерної діагностики процесу», захищеної у 2006 році.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження.

1. На стор. 5–9 дисертації є «Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень». Добре. Але відразу ж на стор. 10 починається знову ж розшифровка скорочень, наприклад (ТС), (ЗК) і так надалі по тексту. Тобто, а навіщо тоді цей «Перелік...» ?

2. Називати конструкційні леговані хромомарганцеві сталі 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18ХГТ, 20ХГТ просто низьковуглецевими (с. 11 дисертації) якось негарно.

3. В роботі є певна плутанина з основами і їх спрямованістю. У меті (стор. 12) це «...розробка наукових основ підвищення продуктивності...», а предметі (стор. 13) це вже «...технологічні основи підвищення

продуктивності і формування якості поверхневого шару зубів...». Тобто 2 варіанта основ (наукові і технологічні) і два варіанта, на що спрямована робота (на продуктивність і на продуктивність і якість). Хоча і якість різна (поверхневого шару зубів і поверхні зубів). Ну добре. Хай так, може здобувач не змогла до кінця визначитися. Але де ця якість в новизні, висновках і рекомендаціях, та власне хоча б і у завданнях дослідження (стор. 12–13)?

4. Деякі визначення в роботі не є однозначними, наприклад, що таке «шорсткість зубчатої поверхні» (стор. 20, 85), «температура шліфування» (стор. 140, 141), де вона, в якому місці, «температура зубошліфування» (стор. 145), тобто зуба по повному профілю чи по впадині між зубами, «...шліфування з обліком ...охолодження» (стор. 163, 171) і аналогічне «...без обліку початкової температури...» (стор. 170) та власне оцей «облік» можна побачити і в авторефераті, а може це просто «з урахуванням», а ніякий не «облік»?

5. Робота присвячена профільному зубошліфуванню і відразу ми визнаємо, які саме матеріали (сталі) зубчастих коліс ми будемо шліфувати (стор. 11), а ось які шліфувальні круги при цьому ми будемо використовувати, ми лише визнаємо на стор. 202. Тобто теоретичний аналіз продуктивності профільного зубошліфування (розділ 2) та розробка наукових основ прикладної теплофізики зубошліфування (розділ 3) проходять безвідносно до характеристик і властивостей шліфувального круга, що якимось дивно, бо продуктивність визначається саме кругом.

6. Стор. 209, табл. 4.3. Шорсткість поверхні за параметром Ra у поперечному і повздовжньому напрямках. Для круга А9960Js12V це складає в поперечному напрямку 0,74–0,91 мкм, а в повздовжньому 0,32–0,39 мкм, тобто в повздовжньому шорсткість як мінімум в 2 рази менше, що цілком логічно. На стор. 212 в табл. 4.6. для того ж круга, але за інших умов, у поперечному напрямку 1,224 – 1,333 мкм, а в повздовжньому 1,162 – 1,272 мкм, тобто близькі. Отут щось не так. Поверхня однакова по шорсткості у різних напрямках не може бути отримана при плоскому повздовжньому шліфуванні.

7. На сторінках 245 – 278 тому «Додатків» наведено 10 актів випробувань та впроваджень розробок на ПАТ «ХМЗ «Світло шахтаря» при безпосередній участі здобувача, причому вони всі відносяться до виконання держбюджетних тем. Все це гарно і викликає позитивне враження, але з цих актів лише один акт на стор. 266 – 273 відноситься до держбюджетної теми 0118U00400, яка згадується на стор. 18 дисертації та стор. 2 автореферату, як тема у відповідності до якої виконана робота. Інші акти відносяться до виконання держбюджетної теми 0116U004530, яка зовсім не згадується на вказаних сторінках. Аналогічно акти впровадження у СумДУ та ІФНТУНГ на стор.299 – 303 також відносяться до теми 0116U004530. Це незрозуміло. Можливо здобувач з якихось причин не врахувала цю тему у списку тем на стор. 18 дисертації та стор. 2 автореферату.

Зазначені зауваження не зменшують наукового рівня виконаного дослідження та практичної цінності результатів роботи і не впливають на

загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. Дисертаційна робота Ліщенко Наталі Володимирівни «Підвищення продуктивності профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК на основі адаптації елементів технологічної системи» є завершеною науковою роботою і містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати, які мають велике практичне значення для вирішення задачі підвищення продуктивності профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК.

2. Наукові положення, отримані в роботі, достовірні і достатні для обґрунтування зроблених висновків. Незважаючи на наведені вище недоліки, дисертація у цілому виконана на достатньо високому науковому рівні. Її нові теоретичні і практичні розробки актуальні, цікаві та достовірні. Оформлення, стиль і мова викладення роботи, хоча і мають певні недоліки, але в цілому достатні.

3. Основний зміст роботи достатньо повно викладено в 65 наукових працях, що відповідають Постанові "Про мінімальну кількість та обсяг публікацій основного змісту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук".

4. Зміст автореферату відображає основні положення роботи.

5. На підставі вище викладеного вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.08 – технологія машинобудування та вимогам п.п. 9, 10 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (із змінами), що надаються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Ліщенко Наталя Володимирівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент,
завідувач відділу
алмазно-абразивної і фізико-технічної обробки
Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля
НАН України, професор, доктор технічних наук


Лавріненко Валерій Іванович

01.10.18 р.

Підпис доктора технічних наук, професора В.І. Лавріненка засвідчую :

Вчений секретар
ІНМ ім. В.М.Бакуля НАН України,
канд. техн. наук


В.В. Смоквина

Відзив надійшов « ___ » _____ р.
Вчений секретар спец. ради _____

